

**Univerzita Karlova v Praze**  
**Přírodovědecká fakulta**

Studijní program: Geologie  
Studijní obor: Geologie



**Ladislav Nábělek**

Magnetické vlastnosti sférulí ze sedimentu v Tunguzce (holocén) a v Severní Americe  
(holocén/pleistocén)  
Magnetic properties of the spherules from sediment in Tunguska (holocene) and North America  
(holocene/pleistocene)

Bakalářská práce

Vedoucí závěrečné práce/školitel: RNDr. Günther Kletetschka, Ph.D.

Praha 2014

**Prohlášení:**

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracoval samostatně, a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce, ani její podstatná část, nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze dne 10. 5. 2014

Podpis

**Poděkování:**

Děkuji svému školiteli RNDr. Güntherovi Kletetschkovi za pomoc při psaní bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval své rodině, kolegyním Barboře Šejblová a Kamile Málkové. Velký dík patří Geologickému ústavu AV ČR a Paleomagnetické laboratoři v Průhonicích. A dále všem, kteří mi věnovali svůj čas při psaní bakalářské práce.

## Abstrakt

Na počátku 20. století, konkrétně 30. června roku 1908, se odehrála událost, která je popisována jako Tunguzka neboli tunguzská událost. Dodnes není zcela jasné, co se toho dne odehrálo a čím byla celá událost vyvolána.

Stejně tak příčiny události Clovis, která je datována do období mladšího dryasu (YD), nejsou zcela jasné. V tomto období došlo k prudkému ochlazení, což mělo za následek vymírání velkých savců.

Pojítkem obou událostí je nález magnetických sférulí ve vrstvě sedimentu. Tento materiál může vznikat několika způsoby: spalovacími procesy fosilních pali, ablací kosmického materiálu procházejícího atmosférou, velkou explozí v atmosféře nebo atmosférickým výbojem (blesk).

Předložená bakalářská práce se zabývá analýzou těchto dvou událostí, a s tím spojeným výzkumem mikroskopických sférulí čili materiálu nejasného původu, nalezeného po těchto událostech ve vrstvě sedimentu v Severní Americe a v oblasti centrální Sibiře. Předmětem práce je porovnání obou událostí a příčin vzniku, na základě výzkumu a laboratorních měření materiálu z Clovis a Tunguzky.

Pro analýzu magnetického stavu sférulí bylo využito metody nemagnetické separace. Na materiálu byla měřena zbytková magnetizace. K měření bylo využito magnetického skeneru.

Na základě laboratorních měření magnetických vlastností sférulí usuzujeme příčiny vzniku těchto událostí.

## Summary

In the early 20th century, 30 June 1908, the event took place, which is described as the Tunguska Event, or Tunguska. It is still not entirely clear what happened that day and the whole event was caused.

The causes of events Clovis which is dated to the Younger Dryas (YD) are not entirely clear. In this period there was a sharp slowdown, which resulted in the extinction of large mammals.

The link between the two events is the discovery of magnetic spherules in the sediment layer. This material may arise in several ways: fossil fuel combustion processes, ablation of cosmic material passing through the atmosphere, a large explosion in the atmosphere or atmospheric discharges (lightning).

This thesis deals with analysis and Tunguska Event and Clovis event, and related research microscopic spherules (material of uncertain origin) found after the events in a layer of sediment in North America and central Siberia. The object is to compare the two events and causes of based on research and laboratory measurements of material from Clovis and Tunguska.

For the analysis of magnetic spherules status was gained by the non-magnetic separation. The material was measured residual magnetization. The measurements were used magnetic scanner.

On the basis of laboratory measurements of magnetic properties of spherules infer the causes of these events.

1	ÚVOD .....	1
1.1	VYMEZENÍ PROBLÉMŮ .....	1
1.2	STRUKTURA PRÁCE .....	1
2	CHARAKTERISTIKA LOKALIT .....	2
2.1	CHARAKTERISTIKA TUNGUZKY .....	2
2.1.1	Geografie .....	2
2.1.2	Geologie .....	3
2.1.3	Popis události .....	3
2.1.4	Hypotézy o původu jevu .....	4
2.1.5	Výskyt sférulí .....	5
2.2	CHARAKTERISTIKA CLOVIS .....	6
2.2.1	Geografie .....	6
2.2.2	Geologie .....	7
2.2.3	Hypotéza možného vzniku .....	8
3	GEOFYZIKÁLNÍ CHARAKTERISTIKY .....	9
3.1	MAGNETISMUS HORNIN .....	9
3.1.1	Jednotky .....	9
3.1.2	Vnější pole, indukované pole, remanentní pole .....	10
3.1.3	Magnetické vlastnosti pevných látek .....	11
3.1.4	Feromagnetismus, antiferomagnetismus a ferimagnetismus .....	12
3.1.5	Demagnetizační pole .....	12
3.1.6	Magnetické domény .....	13
3.1.7	Hystereze .....	14
3.2	MAGNETICKÁ CHARAKTERISTIKA ZRN V PŮDÁCH .....	16
3.2.1	Antropogenní sférule .....	16
3.2.2	Ablační sférule .....	17
3.2.3	Sférule vzniklé explozí exraterestrického tělesa v atmosféře a při dopadu .....	17
3.2.4	Fyzika elektrického výboje .....	18
4	ZKOUMANÝ MATERIÁL A METODY PRÁCE .....	19
4.1.	VZORKY .....	19
4.1	SEPARACE .....	19
4.2	MAGNETICKÉ SKENOVÁNÍ A EXPERIMENT BLESKU .....	19
4.3	SKENOVACÍ ELEKTRONOVÝ MIKROSKOP (SEM) .....	20
5	VÝSLEDKY A INTERPRETACE .....	22
5.1	EXPERIMENT BLESKU .....	22
5.2	OVEŘENÍ NA (SEM) .....	22
5.3	IMPAKTNÍ NEBO PRŮNIKOVÝ KRÁTER .....	24
6	ZÁVĚR .....	25
7	SEZNAM LITERATURY .....	27

# 1 ÚVOD

## 1.1 Vymezení problémů

Předložená bakalářská práce se zabývá analýzou událostí Clovis a Tunguzka. Tyto dvě události spolu vzájemně nesouvisí, přesto v nich nalézáme mnoho podobností. Dodnes není známo, co se na lokalitě Clovis či při události v Tunguzce odehrálo.

Událost Clovis je datována do období mladšího dryasu (Younger Dryas - YD), které započalo koncem pleistocénu a přecházelo do raného holocénu. Jedná se o období krátkého globálního ochlazení, kdy došlo k vymírání megafauny<sup>1</sup>. Toto období započalo před 12 900 lety a trvalo po dobu ~ 1 200 let (Mangerud et al., 1974).

Tunguzská událost se odehrála roku 1908 v oblasti centrální Sibiře. Celá událost byla doprovázena silnou explozí a zanechala po sobě obrovské škody (Trayner, 1997).

Obě události mají něco společného. Spojovacím znakem jsou nálezy magnetických sférulí o velikosti ~ 30 - 100  $\mu\text{m}$ , které se nacházejí ve vrstvách uložených sedimentů (Firestone et al., 2007; Trayner, 1997; Tuček, 1981).

Cílem bakalářské práce bylo shromáždění informací o obou událostech, zjištění procesů vzniku nalezených sférulí a jejich magnetických vlastností. Dále identifikované sférule porovnat a zhodnotit příčiny vzniku těchto událostí.

## 1.2 Struktura práce

Předložená bakalářská práce se skládá ze čtyř hlavních částí. V první z nich je popisována charakteristika jednotlivých lokalit (geografie a geologie), dále popis událostí, hypotézy o původu jevů a popis jednotlivých sférulí nalezených z událostí Tunguzky a Clovis.

Další část je věnována geofyzikálním charakteristikám souvisejících jevů.

Následující kapitoly se věnují praktické části této práce - materiálům, použitým metodám, jako např. separace, skenovací elektronový mikroskop a další.

Součástí práce jsou i výsledná naměřená data.

---

<sup>1</sup> Například zvířata doby ledové jako jsou mamuti, srstnatí nosorožci, šavlozubí tygři.

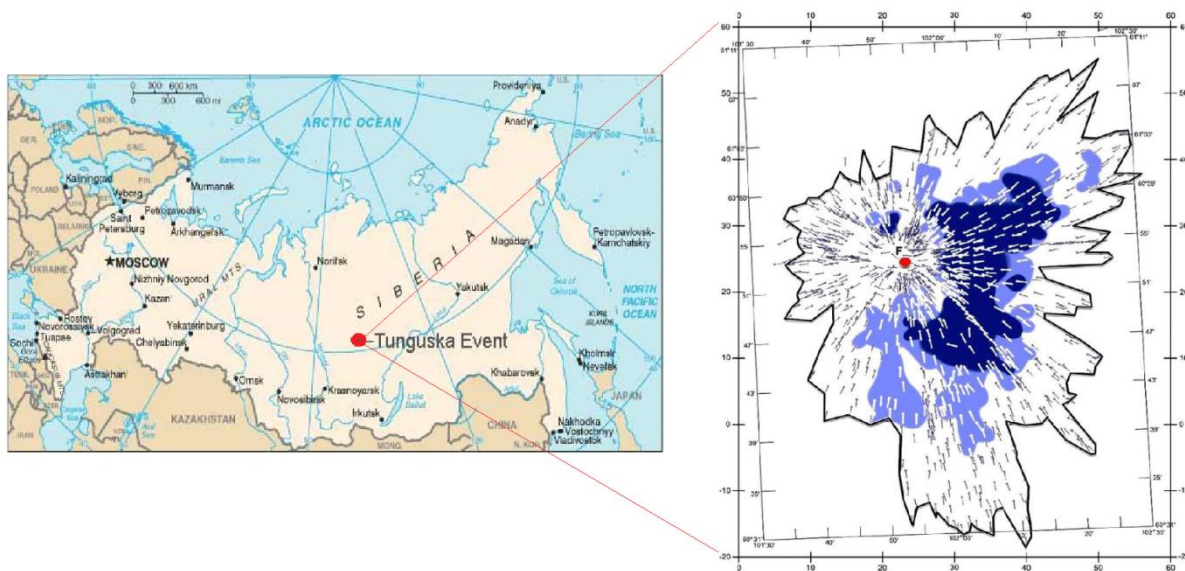
## 2 CHARAKTERISTIKA LOKALIT

### 2.1 Charakteristika Tunguzky

Na počátku 20. století, konkrétně 30. června roku 1908, se odehrála událost, která je popisována jako Tunguzka neboli tunguzská událost. Dodnes není zcela jasné, co se toho dne odehrálo a čím byla celá událost vyvolána. Okolo této záhady existují dodnes různé hypotézy. K Zemi se přibližovalo těleso, které však explodovalo ještě při průletu atmosférou. Přestože byl tento úkaz viditelný na plošně rozsáhlém území, po celé události se nenašel jediný impaktní nebo průnikový kráter. První expedice, která si kladla za cíl osvětlit tunguzskou událost, se vypravila do místa výbuchu až o 19 let později, tedy roku 1927 (Trayner, 1997).

#### 2.1.1 Geografie

Místo události ( $60^{\circ}53'09''\text{N}$ ,  $101^{\circ}53'47''\text{E}$ ) se nachází přibližně 700 km severozápadně od jezera Bajkal a 70 km severně od města Vanavara. Tunguzská událost získala své pojmenování podle řeky Podkamenaja Tunguzka. Zemský povrch je v této oblasti mírně zvlněný, výškové rozdíly v krajině se pohybují okolo 100 m. Oblasti s nižší nadmořskou výškou jsou pokryty močály a rašeliništi, zbytek území pokrývají lesy. Lesním ekotypem je tajga (Trayner, 1997).

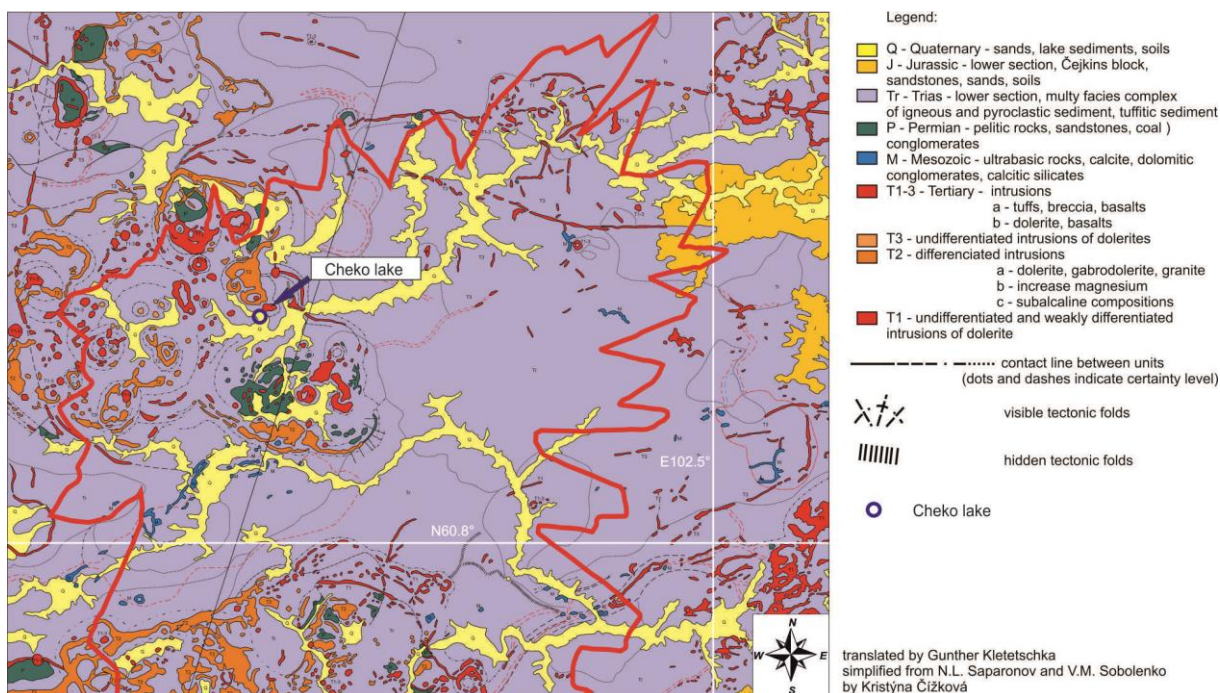


Obr. 1 Poloha epicentra s vymezenou plochou popadaných stromů, které způsobila exploze (zdroj: [http://en.wikipedia.org/wiki/Tunguska\\_event](http://en.wikipedia.org/wiki/Tunguska_event)).



### 2.1.2 Geologie

Z regionálně-geologického hlediska se lokalita nachází v časové oblasti svrchního paleozoika a spodního mesozoika. Horninové podloží je tvořeno převážně bazalty (stáří 200 mil let). V blízkosti epicentra se nachází vyhaslá sopka Mt. Stoikovich. Oblast je ohraničena dvěma řekami, na severu řekou Kimča a na jihu tokem Kušma (Trayner, 1997).



Obr. 2 Schématická geologická mapa území, kde se odehrála událost Tunguzka. Červenou čarou je vymezena plocha popadaných stromů viz Obr. 1 (Kletetschka, Saparonov et. al., 2013; přeložila K. Čížková; nepublikováno).

### 2.1.3 Popis události

V 6:00 hodin ráno místního času oslnil oblohu nad centrální Sibiří, v dnešním Krasnorajském krasu, zářící objekt, který letěl směrem od JV - V. Sklon dráhy je odhadován na 15°- 40°. Těleso explodovalo v atmosféře ve výšce 6-10 km. Exploze byla natolik silná, že v oblasti přibližně 2 000 km<sup>2</sup> bylo vyvráceno a přelámáno kolem 60 milionů stromů. Otřesy zemské kůry byly cítit až ve vzdálenosti 5 500 km (Trayner, 1997).

Explozí byla uvolněna energie kolem 30-50 MT (cca 3000x silnější než atomová bomba v Hirošimě z roku 1945). Výpočet byl proveden na základě tlakové vlny, která zasáhla povrch a způsobila zemětřesení o síle 5 stupňů Richterovy stupnice. Seismická vlna byla zaznamenána na lokalitách v Německu (Jenu, Tbilisi) a v Rusku (Irkutsk). V důsledku exploze vznikl ohnivý sloup a

obrovský oblak kouře, který vystoupil do výšky několika kilometrů. Stanovená rychlost vstupu do atmosféry se odhaduje přibližně na 22-30 km/s (Rubtsov and Ashpole, 2009).

Explozi předcházely tzv. optické anomálie v atmosféře (Bílé noci), které se na obloze objevovaly s třídním předstihem. Anomálie byly zaznamenány směrem na západ a indikovatelné byly až do oblasti Anglie. Po explozi, směrem od epicentra výbuchu, zůstaly na místě pokácené stromy, které jsou uspořádány do tvaru vějíře (viz Obr. 1). Tento tvar je symetrický podle domnělého směru příletu bolidu<sup>2</sup> (azimut 125°). V místě epicentra zůstaly stát ohořelé stromy. Vnější hranice pokácené oblasti se nachází ve vzdálenosti 15 – 35 km od středu epicentra (Trayner, 1997).

#### **2.1.4 Hypotézy o původu jevu**

Dodnes není zcela objasněno, co mohutnou explozi způsobilo. Celá situace tedy vedla ke vzniku mnoha hypotéz, z nichž některé jsou uvedeny níže:

##### *a) Jádro komety*

Hypotézu o jádru komety navrhl roku 1930 Francis Whipple. Na základě dosavadních informací usuzoval, že pravděpodobně došlo k výbuchu jádra komety. Podle jeho tvrzení se kometární meteorit skládal především z ledu a prachu. Při průletu zemskou atmosférou se led vypařil (Rubtsov and Ashpole, 2009).

##### *b) Asteroid*

Hypotézu o dopadu mimozemského tělesa, asteroidu, nelze doložit zbytky nalezeného materiálu v domnělém místě dopadu ani žádným průnikovým kráterem (Rubtsov and Ashpole, 2009).

Hypotéza o výbuchu jádra komety se v dané situaci jeví jako nejpravděpodobnější. O události vznikly i alternativní a spekulativní hypotézy o původu tohoto jevu, které uvádím níže (Rubtsov and Ashpole, 2009).

##### *a) Únik zemního plynu*

Hypotéza o výbuchu velkého množství (~ 10 milionů tun) náhle uniklého zemního plynu (Kundt, 2001).

---

<sup>2</sup> Je název pro velice jasný meteor – světelný jev.

b) *Meteorit z antihmoty*

Phillip J. Wyatt, z Floridské univerzity, tvrdí, že tunguzská událost může být způsobena dopadem meteoritu tvořeného antihmotou (Wyatt, 1958).

c) *Kosmická hmota*

Hypotéza, kterou navrhl geochemik Vladimir Vernadsky, poukazuje na možnost, že se jednalo o kosmickou hmotu (oblak prachu). S podobnou hypotézou přišel také Igor Astapovich, který uvádí, že meteorit se odrazil od spodní vrstvy atmosféry (Rubtsov and Ashpole, 2009).

d) *Kosmická loď*

Hypotéza o ztroskotání kosmické lodi je odvozena z výpovědí svědků. Ti tvrdí, že těleso před výbuchem měnilo směr letu. Po explozi tělesa stoupal k obloze zvětšující se mrak podobný stromu. Jeho tzv. koruna zářila jasným bílým světlem.

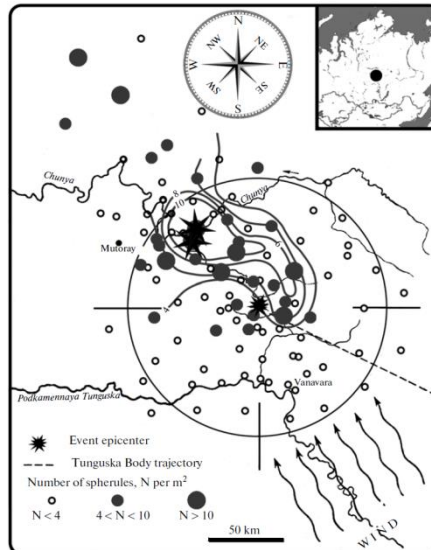
V roce 1945, po explozi první atomové bomby v Hirošimě, spatřil Alexandr Kazantsev strom stojící v epicentru výbuchu, z nějž byly servány větve. Stejný jev pozoroval také v Tunguzce, zde ale nebyl nalezen kráter. Usoudil, že pravděpodobně došlo k nukleární explozi mimozemského původu (Rubtsov and Ashpole, 2009).

### 2.1.5 Výskyt sférulí

Jediným, doposud doložitelným důkazem exploze, jsou sklovité magnetické sférule o velikosti od 30μm do 100μm, které se našly až ve vzdálenosti 400 km od místa dopadu (viz Obr. 3). Chemickým složením odpovídají silikátům a jsou jak zemského, tak kosmického původu. Nalezeny byly v rašeliništi v hloubce 27-36 cm pod povrchem (M. A. Nazarov, 1990; Trayner, 1997; Tuček, 1981).

Dalšími nálezy z místa exploze jsou krystaly magnetitu, kovové částice stříbra (0.1mm dlouhé), sklíčka (mírně natavené oxidy kovu) a kuličky magnetitu obsahující částice z niklu (10.5 % Ni), oxidované částice (Rubtsov and Ashpole, 2009).

Studie z roku 2011 naznačuje, že velká část sférulí v Tunguzce je chondritického složení (D. D. Badyukova, 2011).



Obr. 3: Počet magnetických kuliček z půdy v místě Tunguzka (D. D. Badyukova, 2011).

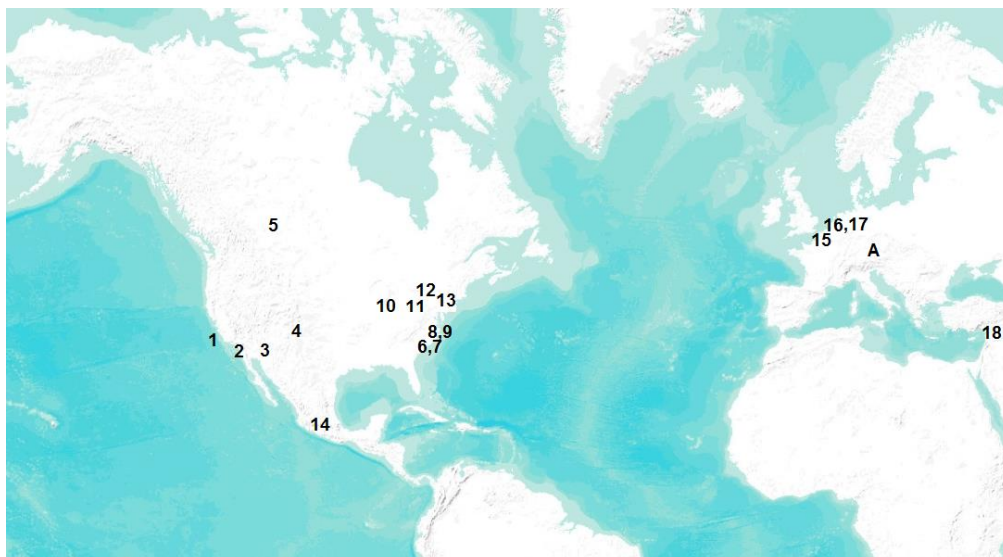
## 2.2 Charakteristika Clovis

Událost je datována do období mladšího dryasu (YD) (Muscheler et al., 2008), které započalo koncem pleistocénu a přecházelo do raného holocénu. V tomto období došlo k prudkému ochlazení (od posledního glaciálního maxima před 20 tisíci lety). Výrazné ochlazení mělo za následek vymírání velkých savců. YD je geologicky krátké období, trvalo  $1\,200 \pm 70$  let a započalo před 12 900 lety (Mangerud et al., 1974). V souvislosti s touto událostí převažuje hypotéza o přerušení cirkulace teplé vody v Golfském proudu, v reakci na náhlý příliv sladké vody z jezera Agassiz, a deglaciaci v Severní Americe (Broecker, 2006).

Ve vrstvě sedimentu z tohoto období se globálně, po celém světě, nachází černá, uhlíkově bohatá vrstva, bohatá na nanodiamanty, skelné útvary, saze a mikroskopicky pravidelné kuličky, v průměru cca 50  $\mu\text{m}$ , složené nejčastěji z Si, Fe, O (Firestone et al., 2006; Firestone et al., 2007).

### 2.2.1 Geografie

Sférule, které byly zkoumány z 12 900 let staré černé vrstvičky, byly odebrány na 18 různých místech Severní Ameriky a nejen tam (viz Obr. 4). Nálezy jsou odhadovány na 10 milionů tun sférulí na 50 milionech  $\text{km}^2$ , na čtyřech kontinentech (Wittke et al., 2013b).



Obr.4: 18 míst, kde byla odkryta vrstvička 12 900 let stará s nálezem sférul - 1) Arlington Canyon, California; 2) Talega, California; 3) Murray Springs, Arizona; 4) Blackwater Draw, New Mexico; 5) Chobot, AB, Canada; 6) Blackville, South Carolina; 7) Topper, South Carolina; 8) Barber Creek, North Carolina; 9) Kimbel Bay, North Carolina; 10) Big Eddy, Missouri; 11) Sheriden Cave, Ohio; 12) Gainey, Michigan; 13) Melrose, Pennsylvania; 14) Cuitzeo, Mexico; 15) Lommel, Belgium; 16) Ommen, Netherlands; and 17) Lingen, Germany; (18) Abu Hureyra, Syria (Wittke et al., 2013b). Písmeno A značí nález sférul v ČR z jezera Švarcenberk v horizontu 12900 let staré (Nabelek et al., 2013).

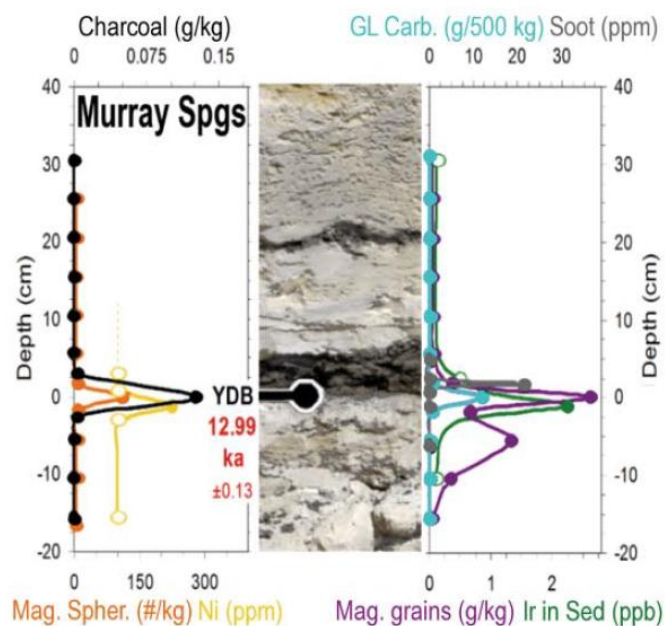
## 2.2.2 Geologie

Indikovaná vrstva sedimentu je černě matná. Na základě objevení této černé, organicky bohaté vrstvy, jsme schopni předpokládat náhlý nástup YD. Přímo ve vrstvě, v rozmezí cca 5 cm, jsou přítomny vysoké koncentrace magnetických mikrosférul, magnetických zrn, nanodiamanty a fullereny obsahující helium. Magnetické mikrosférule jsou v průměru od 10  $\mu\text{m}$  do 250  $\mu\text{m}$  velké. Více než 700 sférul z lokalit na (obr. 4) bylo předloženo detailní geochemické a morfologické analýze. Průměrný obsah sférul na jeden kilogram hmoty je přibližně 390 ks (Wittke et al., 2013b).

Vrstva obsahuje zvýšený podíl iridia a méně jak 0,02% niklu. Černé uhlíkové kuličky a skelné útvary (o průměru několika centimetrů) vykazující kolem 75% uhlíku a 24% kyslíku. (viz Obr. 5) (Firestone et al., 2006).

Některé tyto částice obsahují lachatelierit<sup>3</sup>, který se vytváří při teplotě kolem 2 000° C (podobně je tomu u částic, které se nacházejí v oblastech testování jaderných zbraní) (Bunch et al., 2012).

<sup>3</sup> Amorfni přirozené křemičité sklo, oxid křemičitý.



Obr. 5: Murray Spring je jedna z lokalit v Severní Americe, kde byla datována černá vrstvička.

Vertikální osa značí hloubku v cm nad a pod vrstvou YDB. Křivky jsou barevně označeny, aby odpovídaly přiřazení. Magnetická zrna jsou většinou tmavě hnědá nebo černá, měří od 1  $\mu\text{m}$  do 500  $\mu\text{m}$ . Zrna nepravidelného tvaru a vyskytují se hojněji než mikrosférule. Vykazují zřetelný pik v YDB (vrstvička mladšího dryasu) (Firestone et al., 2006).

### 2.2.3 Hypotéza možného vzniku

Původní hypotézy hovoří o tom, že Země prošla hustým rojem kometárních úlomků. Dokladem tohoto tvrzení mohou být nálezy nanodiamantů, kovových mikrosférulí, iridia, zuhelnělých zbytků či sazí. V neposlední řadě také vymírání megafauny (Firestone et al., 2007).

Později byla tato hypotéza kritizovaná a napadena kvůli špatné interpretaci dat a nedostatku potvrzujících důkazů. Magnetické mikrosférule mohly být do inkriminovaných vrstev (vzhledem k topografii odběrových míst) naplaveny tekoucí vodou. Zbytky po rozsáhlých požárech pravděpodobně pocházejí z antropogenní činnosti, tedy z ohnišť lidí kultury Clovis. Nanodiamanty ve skutečnosti prší na povrch Země prakticky neustále (Boslough et al., 2012; Pinter et al., 2011; Surovell et al., 2009).

Z horizontu 12 900 let probíhá po celém světě neustálý odběr vzorků a shromažďují se data, která by podpořila nebo naopak vyvrátila tuto hypotézu (Bunch et al., 2012; Wittke et al., 2013b).



### 3 GEOFYZIKÁLNÍ CHARAKTERISTIKY

#### 3.1 Magnetismus hornin

Principy, na kterých je založen magnetismu jednotlivých typů hornin, nejsou jednoduché. Je známo, že nositelem remanentní magnetizace vyvřelých hornin je magnetit (Nagata, 1961). Ve skutečnosti je problematika magnetismus hornin mnohem komplikovanější (Krs, 1969). Magnetismus hornin přináší důležité poznatky o podmínkách vzniku jednotlivých typů hornin, sděluje informace o genetických vazbách, o mineralogickém složení, tektonice a o strukturním geologickém uložení datých hornin (O'Reilly, 1984).

##### 3.1.1 Jednotky

Současná literatura uvádí dvě hlavní soustavy jednotek magnetismu: SI soustava (System International) a CGS soustava (Centimetr-Gram-Second). Obě soustavy a vzájemné převodní vztahy mezi nimi jsou uvedeny v (Tab. 1). SI soustava jednotek je mezinárodně schválená soustava jednotek fyzikálních veličin.

Tab. 1: Tabulka základních jednotek magnetismu SI, CGS soustav a vztahy mezi nimi (O'Reilly, 1984).

Jméno	SI	CGS	
Magnetická indukce	B Tesla (T)	B Gauss (G)	$1\text{T}=10^4\text{ G}$
Intenzita magnetického pole	H Am <sup>-1</sup> $\mu_0=4\pi \times 10^{-7}\text{ Hm}^{-1}$	H Oersted (Oe)	$1\text{ Am}^{-1}=4\pi \times 10^{-3}\text{ Oe}$
Permeabilita vakuu (propustnost)	1	$\mu_0=1$	$1\text{ Hm}^{-1}=100/4\pi\text{ G Oe}^{-1}$
Magnetická indukce ve vakuu	$B_0=\mu_0 H$	$B_0=H$	$T=10^4\text{ G}$
Magnetizace	M Am <sup>-1</sup>	I (G)	$\text{Am}^{-1}=10^{-3}\text{ emu cm}^{-3}$
Magnetická indukce v prostředí	$B=B_0+\mu_0 M$	$B=H+4\pi I$	$T=10^4\text{ G}$
Magnetizace na jednotku hmoty	$\delta=M/\rho\text{ Am}^{-1}\text{ kg}^{-1}$	$\delta=I/\rho\text{ G cm}^3\text{ g}^{-1}$	$\text{Am}^2\text{ kg}^{-1}=1\text{ G cm}^3\text{ g}^{-1}$
Objemová magnetická susceptibilita	$\chi=M/H\text{ (SI unit)}$	$\chi=I/H$	$(\text{SI unit})=4\pi\text{ G Oe}^{-1}$ $\text{m}^3\text{ kg}^{-1}=4\pi \times 10^{-3}\text{ G Oe}^3\text{ g}^{-1}$
Susceptibilita na jednotku hmoty	$\kappa=\chi/\rho\text{ m}^3\text{ kg}^{-1}$	$\kappa=\rho\text{ G Oe}^{-1}\text{ cm}^3\text{ g}^{-1}$	

### 3.1.2 Vnější pole, indukované pole, remanentní pole

Ačkoli vnější a indukované magnetické pole jsou po fyzikální stránce stejné, je potřeba jim přiřadit různé jednotky měření, aby se vzájemně odlišily. Jednotky jsou diskutovány v SI soustavě.

Země generuje svoje indukované magnetické pole geodynamem<sup>4</sup>, které působí na nekonečně velké množství materiálu jako vnější magnetické pole  $H$ . Materiál, na základě svých magnetických vlastností, reaguje svojí tzv. jímavostí (magnetickou susceptibilitou)  $\chi$ . V návaznosti na toto se indukuje magnetické pole  $B$ , generuje se v prostředí magnetické pole  $H$  a vzniká magnetizace materiálu  $M$ . Tento vztah je vyjádřen vzorcem (O'Reilly, 1984):

$$B = \mu_0 H + \mu_0 M \quad (1)$$

Magnetická indukce  $B$  uvádí intenzitu magnetického pole vně i uvnitř tělesa, vektorová veličina je shodná se směrem magnetických indukčních čar. Magnetické pole  $H$  je intenzita vnějšího magnetického pole.  $M$  charakterizuje magnetizaci prostředí, kdy je materiál vystaven vnějšímu magnetickému poli. Permeabilita vakua  $\mu_0$  vyjadřuje vliv určeného materiálu nebo prostředí na působení magnetického pole. Vakuum má definovanou hodnotu  $4\pi \times 10^{-7} \text{ Hm}^{-1}$  (O'Reilly, 1984).

Objemová magnetická susceptibilita  $\chi$  materiálu popisuje vztah mezi magnetizací prostředí  $M$  a intenzitou vnějšího magnetického pole  $H$ . Vztah (2) vyjadřuje, jak materiál reaguje na vnější magnetické pole:

$$\chi = \frac{M}{H} \quad (2)$$

Magnetická permeabilita  $\mu$  popisuje vztah mezi intenzitou indukovaného pole  $B$  materiálu a intenzitou vnějšího magnetického pole  $H$  a je dán vztahem:

$$\mu = \frac{B}{H} = \mu_0(1 + \chi) \quad (3)$$

Je-li známa hustota materiálu  $\rho$ , pak množství magnetizace materiálu  $M$  a objemové magnetické susceptibility  $\chi$  může být normalizováno, vzhledem k hmotnosti, pomocí následujících rovnic:

$$\delta = \frac{M}{\rho} \quad (4)$$

a

$$\kappa = \frac{\chi}{\rho} \quad (5)$$

---

<sup>4</sup> Konduktce natavených hmot v oblasti vnějšího zemského jádra.



Specifická intenzita magnetizace  $\delta$  a  $\kappa$  je specifická magnetická susceptibilita (susceptibilita vztažená k hmotě), (Nagata, 1961; O'Reilly, 1984).

### 3.1.3 Magnetické vlastnosti pevných látek

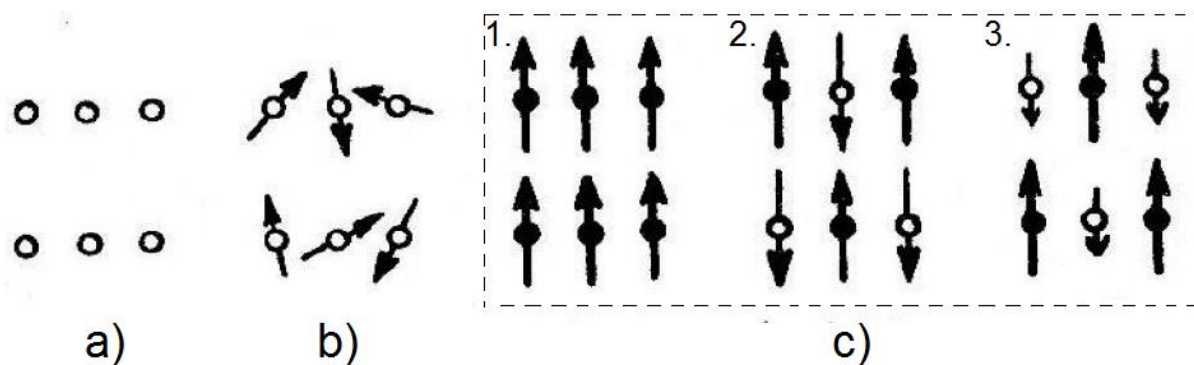
*Magnetické vlastnosti látek jsou rozděleny do tří skupin:*

- a) Diamagnetické,
- b) paramagnetické,
- c) s magneticky souhlasně uspořádanými doménami (řazeny paralelně), (viz Obr. 6):

Vlastnosti látek závisí na uspořádání elektronů ve struktuře atomového obalu. Elektron se pohybuje kolem jádra po svém orbitalu a vytváří magnetický moment. Má ale i svůj vlastní spin, tudíž se točí také kolem své vlastní osy. I zde elektron vytváří magnetický moment. Celkový magnetický moment atomu je dán vektorovým součtem všech magnetických momentů. Pokud látky nemají permanentní magnetický moment (atomární magnetické momenty jsou nulové), chovají se jako látky diamagnetické. Podstatou diamagnetismu je deformace orbitalů elektronů, v důsledku precesního pohybu osy orbitalu, kolem směru působícího magnetického pole. Pokud má atom permanentní vnitřní magnetický moment, je rušení magnetického momentu jen částečné. V tomto případě se jedná o paramagnetismus. Paramagnetické látky se skládají z atomu s nenulovými magnetickými momenty, které jsou v důsledku tepelných vibrací, za pokojové teploty, orientovány chaoticky a jejich vektorový součet je roven nule. Ve vnějším magnetickém poli se magnetické momenty orientují do jeho směru a materiál se postupně magnetuje. S klesající intenzitou magnetického pole, klesá také magnetizace látky. Tyto projevy jsou popisovány veličinou magnetická susceptibilita  $\chi$  (Evans and Heller, 2003), (Sedlák a Štoll, 2002).

*Magnetické vlastnosti souhlasného uspořádání domén:*

Tento typ materiálu se dělí do tří podskupin: feromagnetické, ferrimagnetické a antiferomagnetické. Vlastností těchto materiálů je vysoká citlivost a schopnost získat a udržet si stabilní remanentní magnetizaci. Jednotlivé atomy mají nevyvážené náboje (ionty). Neustálou výměnou elektronů dochází ke vzájemnému vyrovnávání magnetických dipólových momentů atomů. Výměna v elektronech je možná díky příznivé struktuře atomu v materiálu. Magneticky uspořádanými materiály jsou např. oxidy železa (magnetit, magnet, hematit, titanomagnetit, titanomaghematit) (Evans and Heller, 2003; O'Reilly, 1984).



Obr. 6: Grafické znázornění magnetických momentů:

- a) Diamagnetické, b) paramagnetické, c) magneticky souhlasně uspořádané, 1) Feromagnetické, 2) antiferomagnetické, 3) ferrimagnetické. Převzato a upraveno (Gruntorád, 1985).

### 3.1.4 Feromagnetismus, antiferomagnetismus a ferimagnetismus

V závislosti na uspořádání elektronů v jádře dělíme magnetické látky do tří následujících skupin: látky feromagnetické, antiferomagnetické a na látky ferimagnetické. Liší se stylem souhlasné uspořádanosti magnetických momentů v materiálu. Látku můžeme označit jako feromagnetickou v případě, jsou-li všechny Weissovy domény (oblasti, v nichž jsou magnetické dipóly shodně orientovány (Feynman et al., 2011)) v tomto materiálu v souladu s výrazným výsledným magnetickým momentem (paralelní uspořádání), a to za přítomnosti vnějšího magnetického pole  $H$ . Mají velmi vysokou magnetickou susceptibilitu  $\chi$  až  $10^6$  (Dunlop and Özdemir, 2001).

V případě, že je látka složena z protikladných magnetických momentů, vyskytujících se v různých místech atomové struktury, s nerovnou a spontánní magnetizací, označujeme tento materiál jako ferimagnetický (Dunlop and Özdemir, 2001).

Antiferomagnetické látky jsou složeny z protikladných magnetických momentů, které mají stejnou velikost rovnající se 0 (Dunlop and Özdemir, 2001).

### 3.1.5 Demagnetizační pole

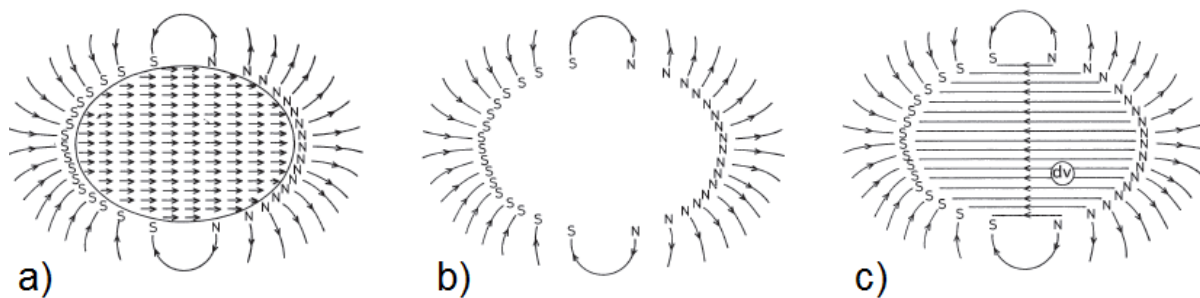
Uvažujme o konečném magnetickém tělese (např. elipsoid), jehož celková magnetizace je rovna součtu množství malých magnetických momentů a následně dělena na vnější a vnitřní magnetická pole, která jsou dále nedělitelná, na sobě závislá, a dále na doplňkové části celkového magnetického pole. Pokud je vnější část magnetického pole velká, je tomu tak i u části vnitřní a naopak.

Na (viz Obr. 7) jsou znázorněny magnetické póly N a S, které se nachází uvnitř elipsoidu, blízko atomových dipólů. Rovnoměrně zmagnetizované těleso pak vede siločáry kolem celého elipsoidu, ale externí pole vzniká z povrchu pólů tělesa a působí prostorově. Proto může být vnitřní magne-

tické pole zanedbáno. Ve vnitřním poli je zóna opačné polarity, vzniká zde tzv. kompenzace a demagnetizační pole (Obr. 7c), které působí opačným směrem než magnetizace  $M$ . Platí vztah:

$$H_d = -NM \quad (6)$$

Kde  $N$  je geometrický faktor závislý na tvaru tělesa (zrna),  $M$  je velikost magnetizace,  $H_d$  demagnetizační pole (záporné znaménko značí změnu směru  $H_d$ ) (O'Reilly, 1984).



Obr. 7: Demagnetizační pole.

- a) Vnitřní polarizace, z povrchu pólů a vnějšího pole jednotně magnetizovaného elipsoidu,
- b) generace identického pole díky matici pólů vnitřní magnetické pole),
- c) celkové pole (převzato (O'Reilly, 1984).

### 3.1.6 Magnetické domény

Magnetické těleso má celkovou magnetickou energii  $E$ , která je dána vztahem:

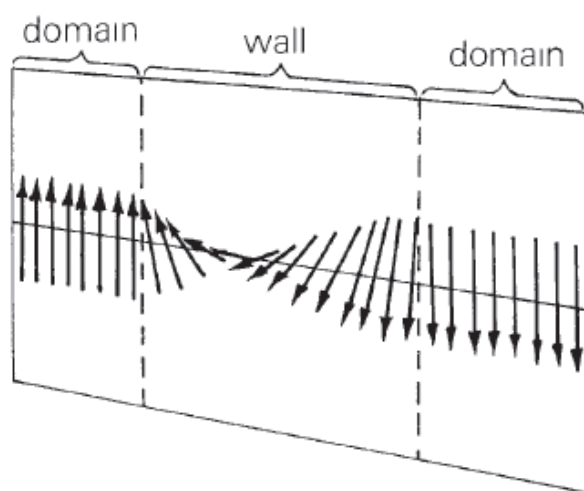
$$E = E_{ex} + E_{self} + E_{\lambda} + E_{anis} + E_h \quad (7)$$

V rovnici veličina  $E_{ex}$  značí výměnnou energii související s kvantovými čísly<sup>5</sup> spinu  $S$ .  $E_{self}$  je magneto-statická<sup>6</sup> energie vztahující se k demagnetizačnímu poli v daném krystalu. Siločáry neprojdou do vzorku. Snížení této energie má za následek vytvoření domén, v nichž jsou magnetické dipóly shodně orientovány.  $E_{\lambda}$  je magneto-elastická (při změně velikosti působící síly dochází ke změně tvaru hysterezní křivky) anizotropní energie generující se díky mírným změnám v rozměrech při magnetizovaném krystalu. To způsobí elastické napětí v mřížce a směr určí magnetizace. Tato energie je minimalizována v tom případě, pokud osa magnetizovaných domén v krystalu je rovnoběžná.  $E_{anis}$ , magneto-krystalická anizotropní energie, značí změnu magnetizace podél různých krystalických os. Tato energie je minimalizována, pokud jde magnetizace podél os krystalu.  $E_h$ , jako vlastní energie, je generována vnějším magnetickým polem.

<sup>5</sup> Kvantové číslo - popis elektronů a jejich orbitalů v atomovém obalu.

<sup>6</sup> Magnetické jevy související s působením neměnného magnetického pole.

Rovnovážný magnetický stav musí splňovat podmínku minima magnetické energie. Aby tato podmínka mohla být splněna, je energeticky výhodnější rozdělit krystal na zmagnetované oblasti se vzájemně odlišným směrem domény. Změna směru magnetizace, při přechodu z jedné domény do druhé, se neděje jedním skokem, ale postupným natáčením až do úplného otočení, tzv. postupné otáčení přes přechodovou vrstvu (doménová stěna) (viz Obr. 8). Využitím energie, potřebné k vytvoření doménové stěny, se snižuje celková magnetická energie materiálu (Jakubovi. Jp, 1966; O'Reilly, 1984). Tloušťka doménových stěn je tzv. kompromisem mezi čelícími vlivy a její velikost se pohybuje kolem cca  $10^{-8}$  m. Účelem doménových stěn je minimalizovat vnitřní energii magnetického materiálu (Thompson and Oldfield, 1986).



Obr. 8: Postupné otáčení spinů o  $180^\circ$  přes doménovou stěnu (Thompson and Oldfield, 1986).

Energetická bilance určuje stav magnetické domény. Pokud objem magnetického minerálu dosáhne kritické velikosti zrna, stává se pak jeho magnetický signál součtem mnoha malých svazků (domén), které jsou od sebe odděleny doménovými stěnami.

Zrna mohou být rozdělena i na základě svého magnetického chování, a to do čtyř skupin v závislosti na velikosti a tvaru zrn. Magnetické chování zrn je klasifikováno následovně: *superparamagnetická zrna (SP)*, *jedno-doménová zrna (SD)* a *více-doménová zrna (MD)*. Superparamagnetická zrna jsou nejmenší, více-doménová zrna pak největší. Pro rozlišení doménových struktur je třeba provést řadu magnetických zkoušek, protože každá z těchto skupin zrn v sobě nese záznam o svém původu a vzniku (O'Reilly, 1984).

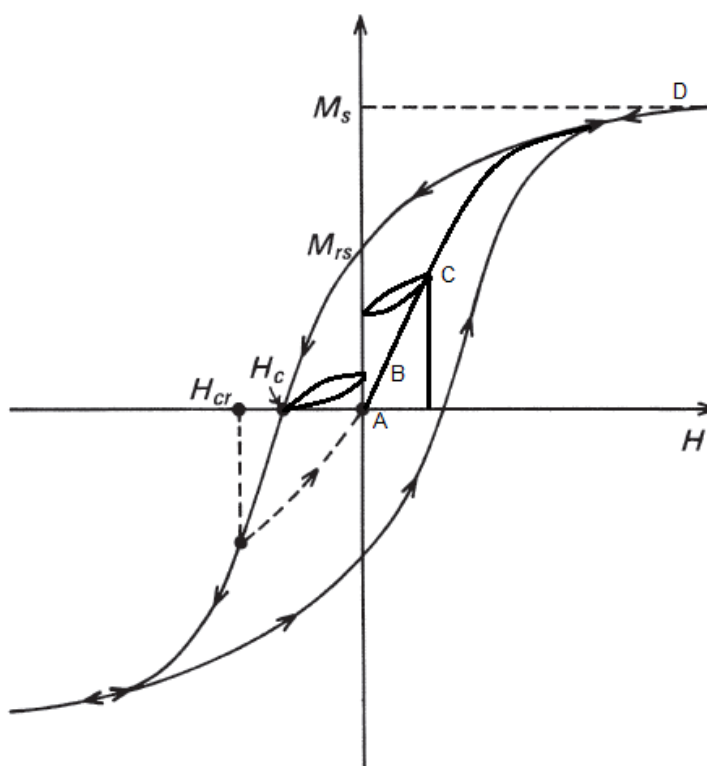
### 3.1.7 Hystereze

Hysterezní smyčka (viz Obr. 9) vykresluje a znázorňuje chování dynamického systému. Popisuje tak vztah intenzity pole  $H$  a magnetizace  $M$ .

Magnetizace vzorku závisí na intenzitě vnějšího magnetického pole  $H$  (Obr. 9). Pokud v oblasti A-B dojde k zvýšení vnějšího magnetického pole  $H$  (v tzv. reverzibilní části) a poté k jeho následnému odstranění, magnetizace  $M$  se vrátí na hodnotu 0 (vzhledem k elastické deformaci doménových stěn v materiálu nedojde k nevratnému přeuspořádání domén). Sklon této části je počáteční citlivost  $\chi_0$  vzorku. To jest vyjádřeno vztahem:

$$\chi_0 = \frac{dM}{dH} \text{ pro } H = 0 \quad (8)$$

Pokud  $H$  překoná reverzibilní část křivky (domény byly plasticky posunuty), začne probíhat magnetické sycení. Poté, když se znovu odstraní vnější magnetické pole  $H$ , materiál si zachová remanentní magnetizaci  $M_r$  (domény si zachovávají směr vnějšího pole). Graficky znázorněno v bodě C. Při použití vnějšího pole  $H$ , tak velkého, aby se magnetizace dostala do úplného nasycení  $M_s$  v bodě D, jsou zarovnány všechny domény v jednom směru. Při použití opačného pole  $H$  bude intenzita magnetizace klesat. Když intenzita pole dosáhne  $H_c$ , tzv. koercivity, magnetizace je nulová. Pro dosažení nulové magnetizace je třeba odstranit remanenci vzorku. Pole  $H$  je třeba vyvolat v opačném směru magnetizace až na koercivitu remanence, hodnotu  $H_{cr}$ .



Obr. 9: Hysterezní smyčka ferrimagnetického a feromagnetického materiálu.  $M_{rs}$  se pro každou teplotu liší. Převzato a upraveno (O'Reilly, 1989).

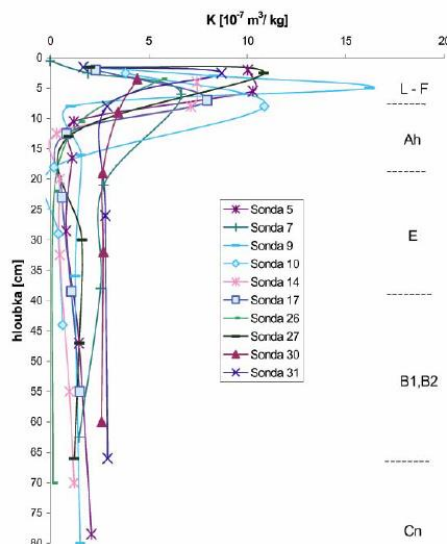
## 3.2 Magnetická charakteristika zrn v půdách

Magnetická charakteristika zrn v půdách závisí na složení magnetických minerálů obsažených v půdě. Závisí také na krystalicko-chemických vlastnostech minerálů tvořících zrno a fyzikálně-chemických podmínkách při vzniku (Gruntorád, 1985). Magnetické sférule, které se mohou vyskytovat, vznikají několika způsoby: *spalovacími procesy fosilních paliv* (Flanders, 1994), *ablací kosmického materiálu procházejícího atmosférou* (Badjukov and Raitala, 2012), *velkou explozí v atmosféře* (srážka extraterestriálního tělesa s povrchem Země, příp. výbuch atomové bomby) (Bunch et al., 2012), *atmosférickým výbojem* (blesk) (Wasilewski and Kletetschka, 1999).

### 3.2.1 Antropogenní sférule

Antropogenní sférule jsou výsledkem vysokoteplotní oxidace, transportu Fe-obohacených jílových minerálů, které jsou částečně zastoupeny ve fosilních palivech, nebo rezidua z oxidace pyritu a sideritu. Nejčastěji jsou přítomny v atmosférickém spadu. Jejich zdrojem jsou spalovací procesy fosilních paliv. Znečištění z průmyslových provozů jako jsou ocelárny, cementárny, ale i automobilový provoz (Flanders, 1994).

Jsou tvořeny Fe-oxidy, magnetitem ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), maghemitem ( $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ) a hematitem ( $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ). Tyto látky jsou většinou spékané na amorfni Si fázi a nejčastěji vytvářejí kulovitý tvar a magnetickou fázi (Flanders, 1994). Jejich velikost se pohybuje kolem 30  $\mu\text{m}$ . Z magnetického hlediska převažují více-doménové struktury. Magnetické vlastnosti částic jsou závislé na výchozím materiálu (uhlí). Při spalování uhlí, kde se nachází pyrit ( $\text{FeS}_2$ ), se uvolňuje jak oxid siřičitý  $\text{Fe}_2\text{S}_3$ , tak v menší míře ve formě  $\text{Fe}_7\text{O}_8\text{S}$ . Železo, které je uvolněno, se dostane do ferrimagnetických minerálů a s ostatním prachem (tuhé částice s průměrem menší než 500  $\mu\text{m}$ ) je emitováno do atmosféry (Magiera and Strzyszczyk, 2000). Produkty fosilního spalování obsahují 10 % ferrimagnetických částic (Kapička et al., 2000). Dopad antropogenních ferrimagnetických částic a sférul se projevuje i na magnetické susceptibilitě (viz Obr. 10). Ta je výrazně zvýšena o ~ 4-6 cm hloubky, což svědčí o zvýšení emisí průmyslového provozu za posledních několik desítek let (Kapička et al., 2004).



Obr. 10: Hloubkové profily hmotnostně-specifické magnetické susceptibilitě ( $\kappa$ ) pro půdní sondy v různých lokalitách regionu Krkonošského národního parku (Kapička et al., 2004).

### 3.2.2 Ablací sférule

Ablací sférule vstupují do atmosféry při rychlosti přibližně  $\sim 30 \text{ km.s}^{-1}$ . Záleží na jejich velikosti a úhlu vstupu do atmosféry. Zde se mění hustota atmosféry, která stoupá s hloubkou. Těleso, které do ní narazí meziplanetární rychlostí, se začne o atmosféru brzdít, vzniká tření a natavuje se povrch, který se následně vypařuje. Malé meteority se mohou vypařit úplně, tudíž neproniknou až na povrch Země.

U meteoritu dochází k termální degradaci povrchu. Tomu napomáhá vysoký obsah kyslíku, který, například u kovových meteoritů, způsobuje exotermickou oxidaci hmoty a ještě rychlejší odhořívání a tavení povrchu (Stulov, 1995). Z povrchu se oddělují úlomky, vznikají roztavené kapky. Teplota tavení je odhadována na cca  $1\,600^\circ\text{C} - 2\,180^\circ\text{C}$  (odvozeno z meteoritu Sikhote-Alin, který dopadl v roce 1947 do oblasti jihovýchodní Sibíře). Na místě se našly ablační sférule, které obsahovaly natavený magnetit  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  (teplota tání  $1\,600^\circ\text{C}$ ). Meteorit obsahoval malé množství chromu (Cr), sférule však ne, což bylo vysvětleno teplotou tání, která je u Cr vyšší než  $2\,180^\circ\text{C}$  (Badjukov and Raitala, 2012). Natavené kapičky se oddělují s prachem (tuhé částice s velikostí menší než  $500 \mu\text{m}$ ) od meteoritu a vzniká kouřová stopa. Natavený materiál kondenzuje a kapičkami v okolní nízké teplotě okamžitě chladnou a padají na povrch Země jako ablační sférule. Ablací sférule obsahují z největší části železo (Fe) a nikl (Ni) (Badjukov and Raitala, 2012).

### 3.2.3 Sférule vzniklé explozí extraterestrického tělesa v atmosféře a při dopadu.

Sférule mohou vzniknout také při střetu extraterestrického tělesa s povrchem Země. Podobný proces je popsán na místech, která slouží ke zkouškám atomových zbraní (Bunch et al., 2012).

Vznik těchto sférulí lze demonstrovat na jednoduchém příkladu: Rychlost objektu v meziplanetárním prostoru je  $\sim 30\text{km/s}$ . Odpořem vzduchu atmosféry se dané těleso zpomaluje, až se objekt o velikosti  $\sim 1\text{km}^3$  zastaví úplně. Ztrácí veškerou svou kinetickou energii, která se mění v teplo. Kinetická energie je dána vztahem:

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 \quad (9)$$

Po přeměně kinetické energie na teplo ( $\sim x \cdot 10^{19}\text{ J}$ ) se výpary a ostatní produkty exploze roztahují a nasávají povrchový materiál pod místem exploze (vzniká podtlak). Materiál (prachové částice) se v kontaktu s vysokou teplotou taví a vypařuje. Vytváří se tak konvektivní bubliny, které jsou vynášeny do vysokých vrstev atmosféry, kde kondenzují v pevné kapičky, a následně padají zpět na povrch Země, jako utuhlé sférule (Bunch et al., 2012).

### 3.2.4 Fyzika elektrického výboje

Sférule mohou vznikat také atmosférickým výbojem blesku, který generuje magnetické pole. Blesk vytvoří silné magnetické pole  $\sim 1\text{T}$  a vysokou teplotu až  $6\,000^\circ\text{C}$  (Leblanc et al., 2008). Zásahem blesku, do rudy bohaté na minerál magnetit, který má maximální magnetizaci před zásahem  $\sim 1\text{-}2\%$ , se magnetit roztaví a po okamžitém zchladnutí si ponechá magnetizační záznam blesku. Tímto přirozeným procesem vzniká lodestone<sup>7</sup>, magnetovec (Wasilewski and Kletetschka, 1999).

Sférule, které vzniknou bleskem, se chovají podobně. Při zásahu magnetitu dojde k roztavení, vypařování a okamžitému chladnutí ( $<1\text{s}$ ). Sférule si tak zachovávají maximální možnou magnetizaci, jsou magneticky nasycené polem blesku (Wasilewski and Kletetschka, 1999).

---

<sup>7</sup> Lidé v dávných dobách používali k namagnetování střepek do kompasu horninu „lodestone“ neboli magnetovec, aby se mohli pohybovat po mořích a oceánech. Hornina lodestone je nasycený magnetit.



## 4 ZKOUMANÝ MATERIÁL A METODY PRÁCE

Pokud by byly sférule vytvořeny atmosférickým výbojem, který natavil pozemní materiál, tak se v průběhu těchto výbojů generuje intenzivní magnetické pole  $\sim 1\text{T}$  (velikost vygenerovaného magnetického pole je závislá na druhu blesku a vzdálenosti). Po rychlém ochlazení ( $<1\text{s}$ ) těchto natavených sférických částic zůstává zachovaná maximální magnetizace (Kletetschka, 2001; Wasilewski and Kletetschka, 1999). Z toho důvodu je třeba přezkoumat magnetické vlastnosti sférul, s cílem prověřit jejich přirozený magnetický stav.

### 4.1. Vzorky

Referenční materiál (sediment) byl odebrán na dvou místech v Severní Americe (SA) - Gainey v Michiganu a Blackwater Draw v Novém Mexiku. Tento materiál odpovídá horizontu 12 900 let (Bunch et al., 2012).

Z epicentra Tunguzky byl odebrán materiál odpovídajícího stáří  $\sim 106$  let.

### 4.1 Separace

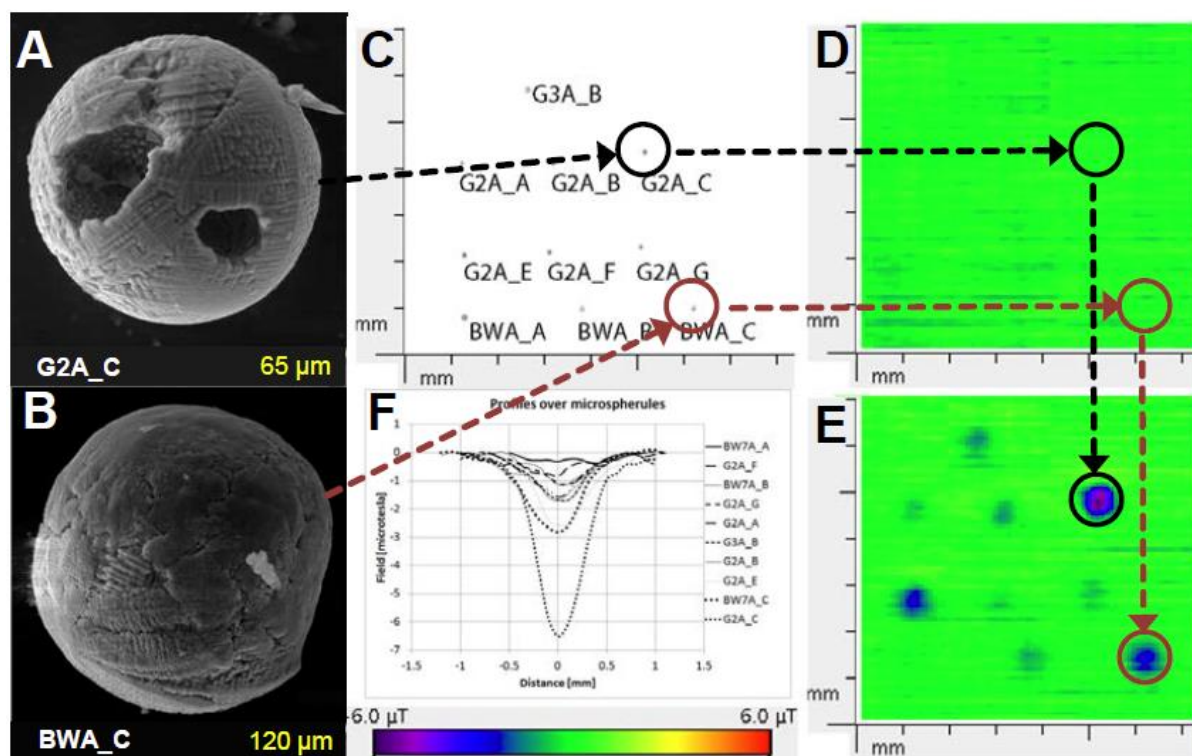
U referenčního materiálu (SA) bylo třeba zanalyzovat přirozený magnetický stav sférulí. Tento materiál tedy nemohl být magneticky extrahován podle protokolu, (Israde-Alcantara et al., 2012), ale bylo nutno využít metody nemagnetická separace, která byla provedena přes síta o různých velikostech (100, 200, 325, 400 mesh; respektive  $\sim 37, 44, 74, 149\text{ }\mu\text{m}$ ). Oddělený materiál se pomocí ultrazvukové techniky očistil od přebytečného jílů. U jednotlivých frakcí byla použita hustotní kapalina pro oddělení těžkých zrn (magnetit a sférule) od převažujících křemenných zrn. Sférule byly identifikovány pod optickým mikroskopem a umístěny na podložní sklíčko.

Pro analýzu materiálu z Tunguzky bylo nutné provést standardní postup magnetické extrakce podle (Israde-Alcantara et al., 2012) a zjistit, zda se opravdu jedná o vrstvu sedimentu, ve kterém jsme předpokládali výskyt sférulí. Již v malém množství extraktu 25 gramů byly nalezeny 3 sférule, které byly následně analyzovány pomocí skenovacího elektronového mikroskopu (SEM).

### 4.2 Magnetické skenování a experiment blesku

Pro skenovací analýzy byl použit magnetický skener sestavený americkou společností Youngwood Science and Engineering (YSE). Skener se skládá ze stacionární Hallovy sondy a 2D motorizovaného stolku, jehož pohyb je řízený softwarem MagScan (rovněž vyvinul YSE). Hallova sonda snímá magnetickou složku kolmo k povrchu skenování (např. geologický výbrus) ze vzdálenosti

0,1mm. Výstupem je 2D obraz, který ukazuje hodnoty magnetizace zjištěné v průběhu skenování po povrchu. Všechny obrazy skenovacího pole jsou normalizovány na 17 x 17 mm (maximální schopnost 2D fáze). Použito z publikace (Kletetschka et al., 2013) (viz Obr. 11 ve zmíněné publikaci).



*Obr. 11:* Magnetické analýzy pro experiment blesku. (SEM) obrazy mikrosférul. Průměry žlutě: A) Gainey, MI sférule (černé šipky a kruhy) a B) Blackwater Draw, NM sférule (červené šipky a kruhy). C) Rozdělení optických snímků vybraných kuliček na skenovacím podkladu (kruhy kolem černé tečky). D) Magnetické skenování podkladu ve svém přirozeném stavu. Kuličky nejsou viditelné nad zeleným pozadím, indikující, že jsou nenamagnetované. E) Magnetické skenování podkladu po magnetizaci ve směru kolmo do roviny. Sférule jsou nyní vidět na pozadí, což znamená, že jsou magnetizovatelné. F) Obrázek ukazuje profil každé sférule v horizontálním směru. Publikováno v PNAS (Kletetschka et al.; Nabelek et al., 2013; Wittke et al., 2013a; Wittke et al., 2013b).

### 4.3 Skenovací elektronový mikroskop (SEM)

Pro analýzu identifikovaných sférul byl k měření využit skenovací elektronový mikroskop (SEM). Měření byla provedena na Ústavu petrologie a strukturní geologie PřF UK v Praze a také na Geologickém ústavu Akademie věd ČR. Oba ústavy jsou vybaveny skenovacím elektronovým mikroskopem značky Tescan Vega s nainstalovanými detektory BSE (zpět odražené elektrony – možno sledovat rozdíly v relativní průměrné atomové hmotnosti studovaných fází a materiálů), SE (sekundární elektrony – je možno pozorovat povrch vzorku ve velkém detailu, vhodné pro

trojrozměrný objekt) a CL (katodoluminiscence – uplatnění při studiu růstové zonality minerálů, či pozorování rekrystalizace křemene v deformačních horninách). Mikroskop je dále vybaven systémy EDS (detektor- X-MAX 50 výrobce Oxford Instrumens) pro kvalitativní i kvantitativní mikroanalýzu.

## 5 VÝSLEDKY A INTERPRETACE

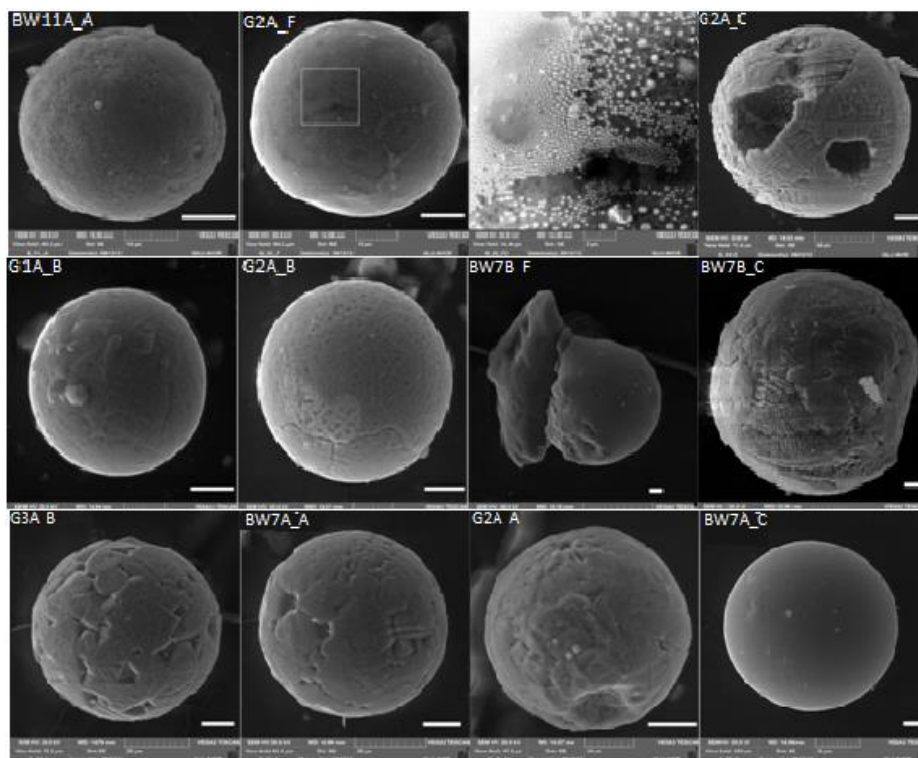
### 5.1 Experiment blesku

Měřeno bylo zbytkové množství magnetizace v mikrosférulích, s využitím magnetického skeneru. Z měření je zřejmé, že za přirozeného stavu, nedošlo k výrazné detekci zbytkové magnetizace sférulí, zatímco pobývali v geomagnetickém poli Země ( $\sim 50 \mu\text{T}$ ). Nicméně poté, co byly vystaveny silnému magnetickému poli (1 T) simulující atmosférický výboj, byla detekována maximální hodnota remanentní magnetizace.

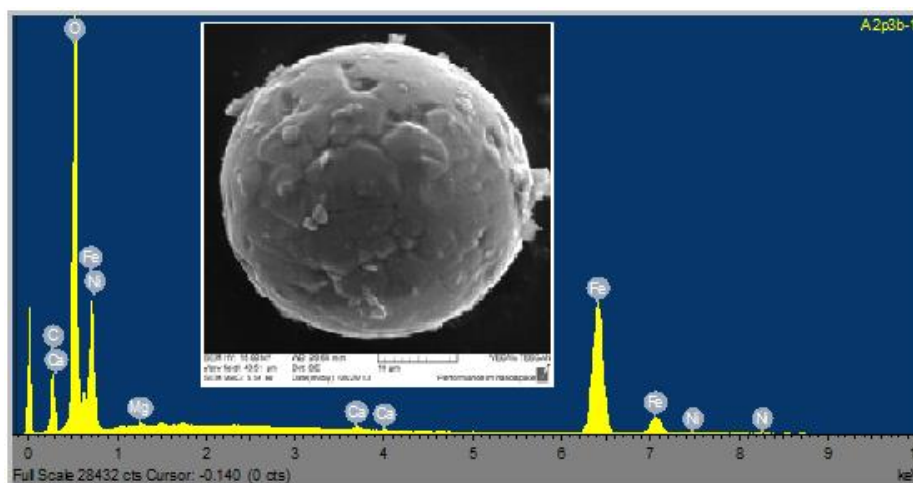
Zjištění tedy posiluje hypotézu, že se jedná o sférule vytvořené během mimozemského nárazu. Vyvrácena je tak hypotéza, že tyto sférule mohly vzniknout během vývoje blesku (Wittke et al., 2013b).

### 5.2 Ověření na (SEM)

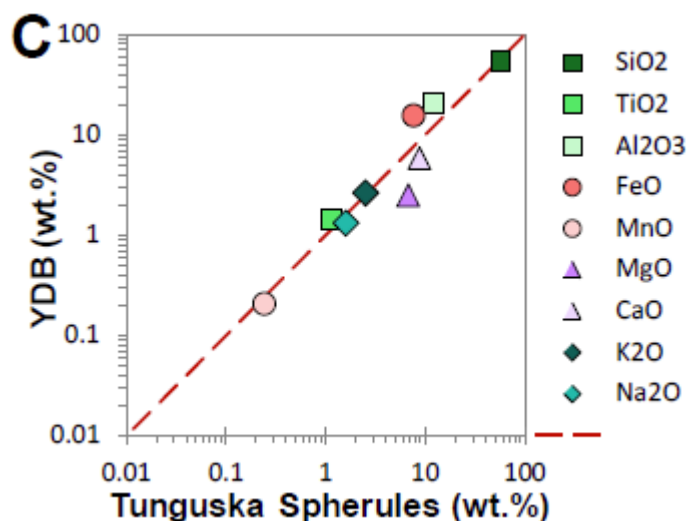
Na (SEM) proběhla kvalitativní analýza složení. Výsledné hodnoty složení sférulí z Gainey a Blacwater v Severní Americe odpovídají hranici (YD) (publikované hodnoty (viz Obr. 14) (Wittke et al., 2013b)). Složení sférulí z lokalit v Severní Americe je porovnané se sférulemi z tunguzské události. Srovnání (viz Obr. 14) ukazuje, že sférule ze všech třech lokalit vykazují známky vzájemné podobnosti. Sférule z Tunguzky obsahují výrazně vysoký podíl železa (Fe) a malý podíl niklu (Ni). Toto zjištění poukazuje na kosmický typ sférulí. Pro zkoumání magnetického přirozeného stavu a detailnější porovnání by bylo třeba více referenčního materiálu (sedimentu).



Obr. 12: Sférule na (SEM) z místa (SA) – sférule začínající písmenkem (G) jsou z lokality Gainey a (B) z lokality Blackwater. V první řadě na G2A\_F je vyznačeno čtvercem pole, ukazující na pravé straně detail textury. Velikost znázorněná v pravém dolním rohu na každém obrázku bílou čarou značí měřítko 10  $\mu\text{m}$ . Sférule obsahují (Si, Ti, AL, Fe, Mn, Mg, Ca, K, Na).



Obr. 13: Sférule z extraktu tunguzského sedimentu z události 106 let staré. Sférule, v průměru o velikosti 40  $\mu\text{m}$ , obsahuje ~ 60% Fe, 0,5 % Ni, 1% Mg, 1% Ca, 40% O.

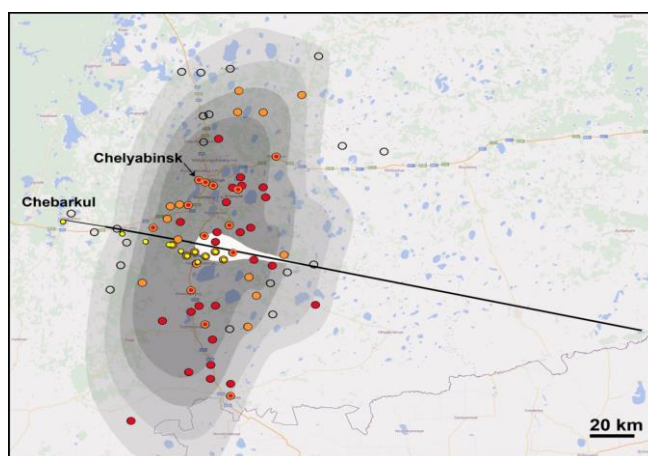


Obr. 14: Porovnání chemického složení (YD) a (T) (Wittke et al., 2013b).

### 5.3 Impaktní nebo průnikový kráter

Dostupné materiály, zabývající se problematikou tunguzské události uvádějí, že není možné, aby šlo o meteorit. Důvodem je chybějící impaktní nebo průnikový kráter v epicentru.

Tunguzce podobnou, avšak recentní událostí, by mohl být dopad Čeljabiského meteoritu ze dne 15. února 2013, kdy meteorit explodoval ve výšce  $\sim 25$  km. Výbuch způsobil na Zemi značné škody, avšak v místě exploze též nebyl nalezen kráter (viz Obr. 15). Průnikový kráter byl později objeven v jezeře Čebarkul  $\sim 70$  km daleko od města Čeljabinsk. Na Obr. 15 je vykresleno, kde byla zaznamenána tlaková vlna. Podobný vějířovitý obrazec vykácených stromů byl zaznamenán i v Tunguzce (viz Obr. 1). Ve středu epicentra byly objeveny stojící stromy.



Obr. 15: Poloha epicentra, s vymezenou plochou rozbitých oken, a způsobených škod, které má za následek mohutná exploze (Popova et al., 2013).

## 6 ZÁVĚR

Cílem práce bylo shromáždit informace o událostech Clovis a Tunguzka. Následně porovnat rysy sférulí, které se nacházejí v obou dvou časových horizontech. Sférule mohou vzniknout alespoň čtyřmi způsoby: *spalovacími procesy fosilních paliv* (Flanders, 1994), *ablací kosmického materiálu procházejícího atmosférou* (Badjukov and Raitala, 2012), *velkou explozí v atmosféře* (srážka Země s extraterestrickým tělesem, výbuch atomové bomby) (Bunch et al., 2012), *atmosférickým výbojem* (blesk) (Wasilewski and Kletetschka, 1999).

V sedimentu ze Severní Ameriky lze spolehlivě oddělit antropogenní sférule, které se nacházejí již několika cm pod povrchem. Výskyt antropogenních sférulí je lokalizován do oblastí kolem spaloven a železáren (Kapička et al., 2004). Dále bylo zjištěno, že ve svrchních půdních vrstvách lze, za pomoci techniky, dobře identifikovat zvýšené hodnoty magnetické susceptibility. Jedná se tedy o místa, kde dominují feromagnetické látky, která převládají v antropogenním spadu (Kapička et al., 2004). Se zvyšující se hloubkou magnetická susceptibilita klesá.

Detailním měřením množství zbytkové magnetizace mikrosférulí, s využitím magnetického skeneru, bylo možné daný materiál určit. Z měření je zřejmé, že nedošlo k výrazné detekci zbytkové magnetizace sférulí, které by zanechal atmosférický výboj, zatímco pobývali v geomagnetickém poli Země ( $\sim 50 \mu\text{T}$ ). Poté, co byly vystaveny silnému magnetickému poli (1 T – simulující atmosférický výboj), byla detekována maximální hodnota remanentní magnetizace, jejíž hodnoty se výrazně lišily od hodnot sférulí v přirozeném stavu. Dospíváme k názoru, který se rozchází s tvrzením hypotézy o vzniku sférulí atmosférickým výbojem. Část těchto výsledků byla publikována v PNAS (Wittke et al., 2013b).

Magnetické vlastnosti sférulí z události Tunguzka, nebyly k dispozici a nebyl včas získán ani dostatek referenčního materiálu k uskutečnění měření, které by mohlo poskytnout informace o magnetických vlastnostech těchto sférulí. Z malého množství materiálu, který byl pro měření poskytnut, vyplývá, že sférule obsahují až 0.5% niklu (Ni), což naznačuje, že mohou být vesmírného původu. Podle některých prací se v místě Tunguzky nachází i dostatek sférulí, kde co se složení týče, převládá zemský materiál a vysoký obsah křemíku (Si). V místě zkoumané oblasti se nenacházejí žádná průmyslová centra, čímž je možné vyloučit antropogenní původ sférulí. Podle získaných a shrnutých dat z Tunguzky, lze předpokládat, že v tomto případě by se mohlo jednat o dopad meteoritu. A to i přesto, že na povrchu nebyl detekován jediný kráter. Celou situaci je možné, alespoň teoreticky, porovnat s nejvíce diskutovanou událostí poslední doby, dopadem Čeljabinského meteoritu, která se stala 15. února 2013, kde meteor explodoval ve výšce  $\sim 25$  km. Výbuch způsobil na zemi značné škody a v místě exploze nebyl nalezen kráter. Průnikový kráter byl později nalezen v jezeře Čebarkul  $\sim 70$  km od města Čeljabinsk. Vějířovitá vymezená oblast poškození od tlakové vlny je nápadně podobná oblasti popadaných stromů v epicentru tunguzské události. V centru epicentra byly též zaznamenané stojící stromy, což vykazuje podobnost s explozí atomové bomby, kdy vznikají sférule

z pozemského materiálu (Bunch et al., 2012). Druhý typ sférulí nalezených v Tunguzce, může mít kosmický původ a vznikat ablací při vstupu tělesa do atmosféry.

Je možné, že tyto dva případy (Clovis a Tunguska) měly podobný charakter vzniku.

Předmětem dalšího výzkumu by mohlo být zaměření se na podrobný výzkum magnetických vlastností problematického materiálu (sférule), příp. zaměření na místa i mimo samotné epicentrum v Tunguzce. Také na hranici vrstvy mladšího dryasu, to v globálním měřítku a hledání možného epicentra, s využitím znalostí o magnetické susceptibilitě, která se projevuje zvýšenými hodnotami v místě výskytu (Nabelek et al., 2013). Výsledný výzkum by mohl přiblížit a také objasnit dlouhodobý problém týkající se nejasností ohledně vzniku sférulí v analyzovaných materiálech z daných lokalit.



## 7 SEZNAM LITERATURY

- Badjukov, D., and Raitala, J., 2012, Ablation Spherules of the Sikhote-Alin Iron Meteorite Shower, Lunar and Planetary Institute Science Conference Abstracts, Volume 43, p. 1759.
- Boslough, M., Nicoll, K., Holliday, V., Daulton, T., Meltzer, D., Pinter, N., Scott, A., Surovell, T., Claeys, P., and Gill, J., 2012, Arguments and evidence against a Younger Dryas impact event: Geophysical Monograph Series, v. 198, p. 13-26.
- Broecker, W.S., 2006, Was the younger dryas triggered by a flood?: Science, v. 312, p. 1146-1148.
- Bunch, T.E., Hermes, R.E., Moore, A.M.T., Kennett, D.J., Weaver, J.C., Wittke, J.H., DeCarli, P.S., Bischoff, J.L., Hillman, G.C., Howard, G.A., Kimbel, D.R., Kletetschka, G., Lipo, C.P., Sakai, S., Revay, Z., West, A., Firestone, R.B., and Kennett, J.P., 2012, Very high-temperature impact melt products as evidence for cosmic airbursts and impacts 12,900 years ago: Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, v. 109, p. E1903-E1912.
- D. D. Badyukova, A.V.I., J. Raitalab, and N. R. Khisinaa, 2011, Spherules from the Tunguska Event Site: Could They Originate from the Tunguska Cosmic Body?: Geochemistry International,, v. 49, p. No. 7, pp. 641–653.
- Dunlop, D.J., and Özdemir, Ö., 2001, Rock Magnetism: Fundamentals and Frontiers, Cambridge University Press.
- Evans, M.E., and Heller, F., 2003, Environmental Magnetism: Principles and Applications of Enviromagnetics, Academic Press.
- Feynman, R.P., Leighton, R.B., and Sands, M., 2011, The Feynman Lectures on Physics: Mainly Mechanics, Radiation, and Heat, Basic Books.
- Firestone, R., West, A., and Warwick-Smith, S., 2006, The Cycle of Cosmic Catastrophes: How a Stone-Age Comet Changed the Course of World Culture, Inner Traditions/Bear & Co.
- Firestone, R.B., West, A., Kennett, J.P., Becker, L., Bunch, T.E., Revay, Z.S., Schultz, P.H., Belgia, T., Kennett, D.J., Erlandson, J.M., Dickenson, O.J., Goodyear, A.C., Harris, R.S., Howard, G.A., Kloosterman, J.B., Lechler, P., Mayewski, P.A., Montgomery, J., Poreda, R., Darrah, T., Hee, S.S.Q., Smitha, A.R., Stich, A., Topping, W., Wittke, J.H., and Wolbach, W.S., 2007, Evidence for an extraterrestrial impact 12,900 years ago that contributed to the megafaunal extinctions and the Younger Dryas cooling: Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, v. 104, p. 16016-16021.
- Flanders, P.J., 1994, COLLECTION, MEASUREMENT, AND ANALYSIS OF AIRBORNE MAGNETIC PARTICULATES FROM POLLUTION IN THE ENVIRONMENT: Journal of Applied Physics, v. 75, p. 5931-5936.
- Gruntorád, J., 1985, Principy metod užitých geofyziky: celostát. vysokošk. učeb. pro stud. přírodověd. fak. skupiny stud. oborů, Státní nakladatelství technické literatury.
- Israde-Alcantara, I., Bischoff, J.L., Dominguez-Vazquez, G., Li, H.-C., DeCarli, P.S., Bunch, T.E., Wittke, J.H., Weaver, J.C., Firestone, R.B., West, A., Kennett, J.P., Mercer, C., Xie, S., Richman, E.K., Kinzie, C.R., and Wolbach, W.S., 2012, Evidence from central Mexico supporting the Younger Dryas extraterrestrial impact hypothesis: Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, v. 109, p. E738-E747.
- Jakubovi.Jp, 1966, CAREY,R - MAGNETIC DOMAINS AND TECHNIQUES FOR THEIR OBSERVATION: Philosophical Magazine, v. 14, p. 879-&.
- Kapička, A., Jordanova, N., Petrovský, E., and Ustjak, S., 2000, Magnetic stability of power-plant fly ash in different soil solutions: Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy, v. 25, p. 431-436.
- Kapička, A., Petrovský, E., Fialová, H., and Podrázský, V., 2004, Využití magnetické susceptibility lesních půd pro mapování imisní zátěže v regionu KRNP, Štursa, J.–Mazurski, KR–Palucki, A.–Potocka, J.(2003): Geoekologické problémy Krkonoš.–Sbor. Mez. Věd. Konf, Volume 41, p. 55-59.

- Kletetschka, G., 2001, Electric Discharge in Carbonaceous Meteorites?, First Steps in the Origin of Life in the Universe, Springer, p. 157-159.
- Kletetschka, G., Nabelek, L., West, A., and Firestone, R.B., Method for finding grains created by lightning discharge from the Younger Dryas Boundary layer.
- Kletetschka, G., Schnabl, P., Sifnerova, K., Tasaryova, Z., Manda, S., and Pruner, P., 2013, Magnetic scanning and interpretation of paleomagnetic data from Prague Synform's volcanics: *Studia Geophysica Et Geodaetica*, v. 57, p. 103-117.
- Krs, M., 1969, Paleomagnetismus, Ústř. Ústav geol. - Geofond.
- Kundt, W., 2001, The 1908 Tunguska catastrophe: an alternative explanation: *CURRENT SCIENCE-BANGALORE*, v. 81, p. 399-406.
- Leblanc, F., Aplin, K., Yair, Y., Harrison, G., and Lebreton, J.P., 2008, Planetary Atmospheric Electricity, Springer.
- M. A. Nazarov, M.I.K., L. D. Baruskova, 1990, Material Evidence for the Tunguska Bolide Gekhimiya, , p. No.5, 627-638.
- Magiera, T., and Strzyszczyński, Z., 2000, Ferrimagnetic minerals of anthropogenic origin in soils of some Polish national parks: Water, Air, and Soil Pollution, v. 124, p. 37-48.
- Mangerud, J., Andersen, S.T., BERGLUND, B.E., and DONNER, J.J., 1974, Quaternary stratigraphy of Norden, a proposal for terminology and classification: *Boreas*, v. 3, p. 109-126.
- Muscheler, R., Kromer, B., Björck, S., Svensson, A., Friedrich, M., Kaiser, K.F., and Southon, J., 2008, Tree rings and ice cores reveal C-14 calibration uncertainties during the Younger Dryas: *Nature Geoscience*, v. 1, p. 263-267.
- Nabelek, L., Kletetschka, G., Kadlec, J., West, A., Bunch, T., Svitavská-Svobodová, H., and Wittke, J., 2013, Magnetism of Microspheres from the Proposed Younger Dryas Impact Event 12,900 Years Ago, Lunar and Planetary Institute Science Conference Abstracts, Volume 44, p. 1707.
- Nagata, T., 1961, Rock Magnetism, Maruzen Co.
- O'Reilly, W., 1984, Rock and mineral magnetism, Blackie & Son.
- O'Reilly, W., 1989, Rock and Mineral Magnetism, Springer.
- Pinter, N., Scott, A.C., Daulton, T.L., Podoll, A., Koeberl, C., Anderson, R.S., and Ishman, S.E., 2011, The Younger Dryas impact hypothesis: A requiem: *Earth-Science Reviews*, v. 106, p. 247-264.
- Popova, O.P., Jenniskens, P., Emel'yanenko, V., Kartashova, A., Biryukov, E., Khaibrakhmanov, S., Shuvalov, V., Rybnov, Y., Dudorov, A., and Grokhovsky, V.I., 2013, Chelyabinsk Airburst, Damage Assessment, Meteorite Recovery, and Characterization: *Science*, v. 342, p. 1069-1073.
- Rubtsov, V., and Ashpole, E., 2009, The Tunguska Mystery, Springer.
- Sedláček, B., and Štoll, I., 2002, Elektřina a magnetismus, Academia.
- Stulov, V.P., Mirskii, V.N., and Vislyi, A.I., 1995, Aerodynamika bolidov (Aerodynamics of Bolides): Moscow: Nauka. Fizmatlit.
- Surovell, T.A., Holliday, V.T., Gingerich, J.A.M., Ketron, C., Haynes, C.V., Jr., Hilman, I., Wagner, D.P., Johnson, E., and Claeys, P., 2009, An independent evaluation of the Younger Dryas extraterrestrial impact hypothesis: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, v. 106, p. 18155-18158.
- Thompson, R., and Oldfield, F., 1986, Environmental Magnetism, Allen & Unwin.
- Trayner, C., 1997, The Tunguska event: *Journal of the British Astronomical Association*, v. vol.107, no.3, p. p.117-130.
- Tuček, K., 1981, Meteority a jejich výskyty v Československu, Academia.
- Wasilewski, P., and Kletetschka, G., 1999, Lodestone: Nature's only permanent magnet-What it is and how it gets charged: *Geophysical research letters*, v. 26, p. 2275-2278.
- Wittke, J.H., Weaver, J.C., Bunch, T.E., Kennett, J.P., Kennett, D.J., Moore, A.M., Hillman, G.C., Tankersley, K.B., Goodyear, A.C., and Moore, C.R., 2013a, Evidence for deposition of 10 million tonnes of impact spherules across four continents 12,800 y ago: *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 110, p. E2088-E2097.

Wittke, J.H., Weaver, J.C., Bunch, T.E., Kennett, J.P., Kennett, D.J., Moore, A.M.T., Hillman, G.C., Tankersley, K.B., Goodyear, A.C., Moore, C.R., Daniel, I.R., Jr., Ray, J.H., Lopinot, N.H., Ferraro, D., Israde-Alcantara, I., Bischoff, J.L., DeCarli, P.S., Hermes, R.E., Kloosterman, J.B., Revay, Z., Howard, G.A., Kimbel, D.R., Kletetschka, G., Nabelek, L., Lipo, C.P., Sakai, S., West, A., and Firestone, R.B., 2013b, Evidence for deposition of 10 million tonnes of impact spherules across four continents 12,800 y ago: Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, v. 110, p. E2088-E2097.

Wyatt, P.J., 1958, POSSIBLE EXISTENCE OF ANTI-MATTER IN BULK: Nature, v. 181, p. 1194-1194.

**Internetové zdroje:**

[http://en.wikipedia.org/wiki/Tunguska\\_event](http://en.wikipedia.org/wiki/Tunguska_event)